

VU Research Portal

Verkenning van een spectroradiometrische meetmethode voor het monitoren van waterkwaliteits-parameters in Loenderveen en Terra Nova

Laanen, M.L.; Hopman-Ubbels, G.H.J.; van der Woerd, H.J.

2003

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

Laanen, M. L., Hopman-Ubbels, G. H. J., & van der Woerd, H. J. (2003). *Verkenning van een spectroradiometrische meetmethode voor het monitoren van waterkwaliteits-parameters in Loenderveen en Terra Nova*. (IVM Report; No. E-03/03). Instituut voor Milieuvraagstukken.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

Verkenning van een spectroradiometrische meetmethode voor het monitoren van waterkwaliteits- parameters in Loenderveen en Terra Nova

Marnix Laanen, Gerda Hopman, Hans van der Woerd

Rapportnummer E-03/03

27 mei 2003

Deze studie is uitgevoerd in opdracht van Gemeentewaterleidingen Amsterdam (GWA).

IVM

Instituut voor Milieuvraagstukken

Vrije Universiteit

De Boelelaan 1087

1081 HV Amsterdam

Tel. 020-4449 555

Fax. 020-4449 553

E-mail: info@ivm.vu.nl

Copyright © 2003, Instituut voor Milieuvraagstukken

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de houder van het auteursrecht.

Inhoud

Samenvatting	iii
Lijst van symbolen en hun eenheden	v
Lijst van begrippen	vii
1. Inleiding	1
1.1 Aanleiding van dit onderzoek	1
1.2 Doel en opzet van dit onderzoek	1
1.3 Opzet van deze rapportage	2
2. Metingen	3
2.1 Locaties en Tijden van Metingen	3
2.2 Meetomstandigheden	3
2.3 Optische veldmeting met de PR-650 veldspectroradiometer	4
2.4 Optische waterkwaliteitsparameters	5
2.5 Waterkwaliteitsparameters	5
2.6 Inherente optische eigenschappen	6
3. Resultaten	9
3.1 Uitwerking van de reflectiemetingen	9
3.2 Algoritme ontwikkeling	9
3.3 Algoritme voor chlorofyl- <i>a</i>	10
3.4 Algoritme voor verticale lichtuitdoving (K_d)	12
3.5 Algoritme voor totaal zwevend stof (TSM)	13
3.6 Discussie	14
4. Conclusies en aanbevelingen	15
4.1 Toetsing van de OTM-tool algoritmes	15
4.2 Voordelen van de OTM-tool	15
4.3 (Huidige) beperkingen	16
4.4 Aanbevelingen	16
5. Literatuur	19
Appendix I. Kaarten, tabellen en figuren	21
A. Kaart van de meetstations in Loenderveen en Terra Nova.	21
B. Optische en labmetingen waterkwaliteitsparameters.	22
C. Overzicht van gemeten R(0-) spectra op de SIOP tochten	23
D. Beschrijving van de GWA-CDOM dataset CDROM	25
Appendix II. Het meten van de kleur van water	27
A. De kleur van water	27
B. Optisch model	27

C. Reflectiespectrum	28
D. Theoretische achtergrond bij de PR-650 meetmethode	29
Appendix III. Meetprotocol voor gebruik PR-650 in het veld	33

Samenvatting

Gemeentewaterleidingen Amsterdam (GWA) heeft zich tot doel gesteld om in twee plassen rond de Waterleidingplas de eutrofiëring tegen te gaan. Het beperken van de nutriëntentoevoer heeft tot dusverre niet tot het gewenste resultaat geleid, namelijk de terugkeer van waterplanten. Een nieuwe aanpak is het wegvangen van de aanwezige witvis, waardoor het systeem mogelijk in een nieuw ecologisch evenwicht kan worden gebracht. De dominantie van algen zal hierdoor (tijdelijk) opgeheven worden zodat waterplanten een kans krijgen. Dit ingrijpen is een vorm van actief biologisch beheer. GWA wil het verloop van dit experiment te monitoren aan de hand van een aantal parameters, waaronder doorzicht en chlorofyl. Omdat in het systeem een grote ruimtelijke variabiliteit aanwezig is kan deze monitoring niet alleen worden uitgevoerd door middel van bemonstering en labanalyse. In deze studie is onderzocht of de monitoring is uit te voeren met behulp van remote sensing meettechnieken.

In dit rapport worden de resultaten beschreven van deze studie ter voorbereiding op de implementatie van de optische teledetectie methode (OTM) voor het monitoren van optische waterkwaliteitsparameters in Loenderveen en Terra Nova, twee waterlichamen die samen met de Waterleiding Plas onder beheer van GWA vallen. Hierbij worden uit veldspectroradiometrische metingen (vanaf een boot of brug) een aantal waterkwaliteitsparameters afgeleid. Dit vereist de beschikbaarheid van betrouwbare algoritmen (rekenmodellen) om de verkregen reflectiespectra om te zetten in de optische waterkwaliteitsparameters. Een tweede stap bij de implementatie van de meetmethode betreft het opzetten van een meetprotocol en het beschikbaar maken van eenvoudige software waarmee de monsternemers de *in situ* gemeten lichtmetingen met de PR-650 kunnen omzetten in de reflectiespectra, waaruit vervolgens automatisch de concentraties van de optische waterkwaliteitsparameters afgeleid worden.

Om de benodigde algoritmen voor GWA te ontwikkelen en uit te testen zijn een aantal monstertochten uitgevoerd op Loenderveen en Terra Nova gedurende een groeiseizoen (van april tot oktober 2002). Tijdens deze tochten zijn tegelijkertijd reflectiespectra opgenomen en watermonsters genomen, waaraan in het laboratorium de waterkwaliteitsparameters bepaald zijn.

Per dag kunnen met de Optische Teledetectie Methode (OTM) tot 20 metingen worden gedaan van doorzicht, chlorofyl-a en doorzicht. De metingen worden opgeslagen en kunnen ter plaatse of achteraf geanalyseerd worden.

De OTM metingen hebben een standaardafwijking in de bepaling van chlorofyl die minder is dan de metingen door middel van NEN-laboratorium bepaling. Hier staat tegenover dat snel en reproduceerbaar in korte tijd een veel grotere gegevensset kan worden verkregen, vergeleken met dure en trage laboratorium analyse.

Voor de bepaling van doorzicht alleen is de LICOR nauwkeuriger dan OTM-tool.

Lijst van symbolen en hun eenheden

<i>Symbool of afkorting</i>	<i>Verklaring</i>	<i>Eenheden</i>
a	absorptiecoëfficiënt	m^{-1}
b_b	terugwaartse verstrooiingscoëfficiënt	m^{-1}
C	coëfficiënt in relatie tussen $R(0_-)$ en a en b_b	
$Chl-a$	Chlorofyl-a concentratie	$\mu\text{g l}^{-1}$
$CDOM$	absorptie door gekleurde opgeloste organische stoffen	m^{-1}
E_{ad}	neerwaartse irradiantie vlak boven water	$\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$
E_{au}	opwaartse irradiantie vlak boven water	$\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$
E_{wd}	neerwaartse irradiantie vlak onder het wateroppervlak	$\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$
E_{wu}	opwaartse irradiantie vlak onder het wateroppervlak	$\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$
F	fractie diffuus licht van neerwaartse irradiantie	
f	constante voor omrekening van L_{au} naar L_{wu}	
ISM	anorganische zwevende stofconcentratie	mg l^{-1}
IOP	inherente optische eigenschappen	
K_d	verticale neerwaartse lichtuitdoving onderwater	m^{-1}
L_{42}	opwaartse radiantie boven het wateroppervlak bij nadirhoek van 42°	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$
L_{ar}	gereflecteerde radiantie op overgang lucht naar water	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$
L_{au}	aan het wateroppervlak uittredende opwaartse radiantie	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$
L_{sky}	radiantie van hemellicht bij zenithhoek van 42°	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$
L_{wu}	opwaartse radiantie vlak onder het wateroppervlak	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$
Lr_p	radiantie gereflecteerd door diffuse plaat	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$
Lr_{pd}	radiantie gereflecteerd door diffuse plaat, waarbij invloed direct zonlicht geblokkeerd is	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$
n	brekingsindex van water	
Q	coëfficiënt voor omrekening van L_{wu} naar E_{wu}	sr
$R(0_-)$	irradiantiereflectie vlak onder het wateroppervlak	
r_θ	Fresnel reflectiecoëfficiënt voor zonlicht	
r_{dif}	gemiddelde Fresnel reflectiecoëfficiënt voor diffuus licht	

r_{sky}	Fresnel reflectiecoëfficiënt bij een zenithhoek van 42°	
$SIOP$	specifieke inherente optische eigenschappen	
$CHL-a$	Chlorofyl-a concentratie	$\mu\text{g l}^{-1}$
TSM	totaal zwevende stofconcentratie	mg l^{-1}
WQP	waterkwaliteitsparameter	
Z_{SD}	zichtdiepte (gemeten met Secchi-schijf)	m

Lijst van begrippen

apparente optische eigenschappen	optische eigenschappen van water met de daarin aanwezige opgeloste en gesuspendeerde stoffen, die afhangen van de samenstelling en concentratie van de componenten in het water en die afhankelijk zijn van de richting en/of intensiteit van het licht. De <i>AOP's</i> zijn o.a. irradiantiereflectie, doorzicht en verticale lichtuitdoving
cosinuscollector	een lichtsensor waarmee invallend licht gemeten wordt onder een hoek van 180°
donkerstroom	de achtergrondruis van het instrument zonder dat er licht gemeten wordt
fytoplankton	levende deeltjes met fotosynthetische pigmenten
inherente optische eigenschappen	optische eigenschappen van water met de daarin aanwezige opgeloste en gesuspendeerde stoffen, die afhangen van de samenstelling en concentratie van de componenten in het water en die onafhankelijk zijn van de richting en intensiteit van het licht. De <i>IOP's</i> zijn o.a. de absorptie- en de verstrooiingscoëfficiënt
irradiantie (E)	radiantie geïntegreerd over de ruimtehoeken
optische waterkwaliteitsparameters	waterkwaliteitsparameters die met behulp van teledetectie bepaald kunnen worden, zoals algenpigmenten, zwevende stofconcentratie, doorzicht en verticale lichtuitdoving
optische teledetectie	waarneming op afstand van optische parameters, waarbij afstand kan variëren tussen enkele cm's boven het wateroppervlak (veldmethode) tot en met 800 km (polaire satellieten)
radiantie (L)	in- of uitstraling in een ruimtehoek
reflectiespectrum	de verhouding tussen het uittredende en invallende licht net onder het wateroppervlak, afhankelijk van de kleur van het licht
remote sensing	opnamen vanuit vliegtuigen en satellieten, die een ruimtelijk dekkende registratie van de optische parameters leveren
seston	alle zwevende deeltjes in de waterkolom, bestaande uit fytoplankton en tripton
tripton	dode organische deeltjes en anorganische deeltjes

De richting van de radiantie wordt aangegeven met de volgende hoeken.

Θ	neerwaarts gericht licht wordt uitgedrukt in de zenithhoek: de hoek ten opzichte van de verticaal.
Θ_n	opwaarts gericht licht wordt uitgedrukt in de nadirhoek: de hoek ten opzichte van de verticaal. Deze hoek is gelijk aan de zenithhoek van $(180^\circ - \Theta_n)$.
ϕ	de azimuthhoek is de hoek tussen twee verticale vlakken die bepaald worden door a) het vlak van de zon en de waarnemer en b) het vlak van de waarnemer en het punt van meting aan het wateroppervlak.

1. Inleiding

1.1 Aanleiding van dit onderzoek

In routine meetprogramma's worden in het algemeen op een beperkt aantal locaties in een watersysteem *in situ* metingen en monsternamen verricht om inzicht te krijgen in de waterkwaliteitsparameters. Impliciet wordt er voor de binnenwateren van uitgegaan dat een enkel monsterpunt voldoende representatief is om de temporele en trendmatige waterkwaliteit in het hele watersysteem vast te stellen.

Voor het opzetten en instandhouden van een effectief waterkwaliteitsmeetnet, is het belangrijk om inzicht te hebben in de ruimtelijke variatie van de te meten waterkwaliteitsparameters, zowel tussen watersystemen als binnen watersystemen. Nieuwe technieken zoals optische teledetectie van oppervlaktewater kunnen hierbij gebruikt worden. Vanuit het *remote sensing* onderzoek zijn methoden ontwikkeld om optische parameters, zoals de concentratie van algenpigmenten (vnl. Chl-*a*) en zwevende stofconcentratie te schatten aan de hand van metingen van het gereflecteerde licht uit het water. Er is een veldradiometrische methode ontwikkeld waarmee direct in het veld gereflecteerd licht gemeten kan worden met een veldspectroradiometer (Gons, 1999).

Door aansluiting op een computer kunnen optische waterkwaliteitsparameters direct in het veld (of aansluitend aan de veldmetingen) worden bepaald (Gons, 1999). Dit wordt gedaan met algoritmen die gekalibreerd zijn met *in situ* metingen. Voor een doorsnede van de Nederlandse binnenwateren en voor het IJsselmeer in het bijzonder zijn al algoritmes ontwikkeld voor het bepalen van de chlorofyl-*a* concentratie (Gons, 1999) de zwevende stof en de verticale lichtuitdoving (Gons *et al.*, 1998; Gons 1999, Rijkeboer *et al.*, 1999; STOWA 2001).

Omdat de optische meetmethode in principe direct, handzaam, schoon, milieuvriendelijk, robuust en op termijn kostenbesparend is zal deze techniek goed te gebruiken zijn als complementaire meettechniek voor waterbeheerders

1.2 Doel en opzet van dit onderzoek

Doel van dit onderzoek is het voorbereiden en demonstreren van het gebruik van een PR650 veldspectroradiometer voor het routinematig bepalen van met name de extinctiecoëfficiënt en gerelateerde waterkwaliteitsparameters in de Loenderveense plas en de petgaten bij Terra Nova.

De voorbereiding heeft plaatsgevonden aan de hand van metingen op de "SIOP-tochten"; drie velddagen om algoritmes te kalibreren. Hiervoor zijn behalve veldspectra ook labbepalingen uitgevoerd. Er zijn zeven metingenreeksen gedaan per SIOP tocht op één dag, te weten drie in de Loenderveense plas, twee bij de petgaten nabij Terra Nova en twee in het heldere deel van terra Nova. Elke meetreeks bestaat uit het nemen van watermonsters in triplo en metingen met de PR650 veldspectroradiometer en doorzicht en plaatsbepaling met een GPS. Daarna vindt laboratorium analyse aan watermonsters plaats: Chlorofyl-*a* concentratie, zwevend stofgehalte (totale fractie plus fractie organisch en anorganische) en de Inherente Optische Eigenschappen van deeltjes in het water. Uit deze parameters worden de

optische eigenschappen van chlorofyl-a, tripton en CDOM bepaald; de specifieke inherent optische eigenschappen (SIOP) die een belangrijke rol spelen bij de OTM-algoritmes.

De resultaten verkregen uit laboratorium analyses en geanalyseerde reflectiemetingen zijn vergeleken en de bestaande algoritmen (Rijkeboer 1999, 2001). Lichte aanpassing van de bestaande algoritmen zijn gebaseerd op de resultaten van de SIOP-meettochten. Aan de hand van vergelijking met de in-situ metingen worden uitspraken gedaan over de nauwkeurigheid van deze methode.

Door het IVM is de OTM-tool ontwikkeld. Hiermee is het mogelijk om het reflectiespectrum te berekenen uit de metingen en direct aan boord om te zetten in de gewenste waterkwaliteitsparameters. Deze eenvoudig te bedienen software (Excel-sheets met macro's) zal worden aangepast aan de algoritmen die speciaal voor de bovengenoemde plassen is ontwikkeld.

Tenslotte is in 2002 ook aandacht geweest voor het aantonen van de toepasbaarheid van de methode in het veld. In de zgn. "Spectra tochten" in totaal vijf tochten uitgevoerd die dienen om de drie watersystemen te monitoren. Per vaartocht is een zo groot mogelijk aantal PR650 metingen, gecombineerd met GPS metingen, gebiedsdekkend uitgevoerd. Het doel is om de toepasbaarheid van de methodiek aan te tonen, een monitoring strategie te ontwikkelen en alvast een meetset voor het jaar 2002 te verzamelen. De spectra van deze tochten kunnen bijvoorbeeld worden gebruikt om de seizoensvariatie in chl-a, TSM en Kd te bestuderen. Deze metingen worden binnen het raamwerk van dit project niet verder uitgewerkt.

1.3 Opzet van deze rapportage

Dit verdere opzet van deze rapportage is als volgt: In hoofdstuk 2 worden de metingen beschreven en wordt een uitwerking gegeven van de bepaling en van reflectiespectra, IOP en concentratiebepaling van chlorofyl (CHL), totaal zwevende stof (TSM of tripton) en Kd.

In hoofdstuk drie worden de volgens NEN-norm bepaalde concentraties van CHL en TSM vergeleken met waarden die uit de reflectiespectra worden afgeleid met bestaande algoritmes. Op basis hiervan worden verbeteringen in deze algoritmes afgeleid en wordt een uitspraak gedaan over de relatie met de in-situ metingen (correlatie en nauwkeurigheid).

In hoofdstuk vier worden de ervaringen tijdens de SIOP en SPECTRA tochten geëvalueerd.

In een drietal appendices wordt in meer detail een overzicht gegeven van de metingen en wordt de spectraradiometrische methode nader toegelicht.

2. Metingen

2.1 Locaties en tijden van metingen

In 2002 zijn op acht dagen, lopende van 3 april tot 12 september (zie Tabel 2.1), metingen verricht van de waterkwaliteit in de Loenderveense plas en bij Terra Nova. Data en type van de velddagen, alsmede het aantal bezochte stations is weergegeven in Table 2.1. Een overzichtskaart van de meetstations en aanduiding is opgenomen in Appendix 1.

In totaal zijn op 20 locaties PR650 metingen verricht, 10 in de Loenderveense plassen en 10 in Terra Nova. Op 7 van deze 20 locaties zijn op de drie SIOP velddagen de SIOP's bepaald in het lab. In de vijf Spectra tochten zijn alle locaties bezocht en zijn reflectiespectra bepaald met een PR650 meetreeks. De SIOP locaties (3 in Loenderveen en 4 in Terra Nova) hebben stationsnamen eindigend op 'C' voor concentratie. Vanwege beperkingen aan het aantal monsters dat door het lab behandeld kan worden met betrekking tot de capaciteit enerzijds en de vereiste verwerkingstijd anderzijds is het niet mogelijk om meer dan 7 stations per velddag te bemonsteren.

Tijdens de SIOP-tochten werden gelijktijdig aan de veldspectroradiometrische metingen watermonsters genomen voor de laboratoriumanalyses. Overige bepalingen ter plaatse waren de verticale lichtuitdoving, positiebepaling m.b.v. een hand-held GPS, tijdstip van meting, golfhoogte, windsnelheid en windrichting, bewolkingbedekking.

Vanwege onder meer het weer en / of tijdsgebrek was het niet mogelijk alle 20 stations op elk van de 5 spectra velddagen te meten. Men moet hierbij bedenken dat de meeste tijd opgaat aan het varen naar de volgende positie, exact bepaald met een GPS. De meting zelf beslaat minder dan 5 minuten. Op 14 augustus zijn door tegenslag de helft van de metingen verloren gegaan. Ter compensatie zijn op de laatste SIOP tocht van 12 september extra metingen verricht.

Tabel 2.1 Data en type van de velddagen, met aantal bezochte stations.

Datum	Type	Aantal stations
3 april	Spectra 1	17
24 april	SIOP 1	7
15 mei	Spectra 2	20
5 juni	Spectra 3	20
26 juni	Spectra 4	20
24 juli	SIOP 2	7
14 augustus	Spectra 5	10
12 september	SIOP 3	9

2.2 Meetomstandigheden

De metingen zijn verricht aan boord van kleine boten van GWA met uitzondering van station TNH-1-C welke is bemonsterd vanaf een bruggetje. Het weer op de verschillende velddagen was zeer divers van aard. Een aantal stations kon op 5 juni niet goed gemeten worden vanwege regenachtige omstandigheden. Verder zorgden snel veranderende lichtomstandigheden op meerdere velddagen voor variabele reflectie van ingestraald licht op het water. Dit

kon worden ondervangen doordat er per locatie minstens 3 meetseries spectrale metingen werden genomen.

Tijdens de bemonsteringen was geen sprake van het optreden van drijfslagen. Het aantreffen van drijvende algenmassa's heeft als consequentie dat de watermassa niet als homogeen beschouwd mag worden over de diepte en dat de monsternamen op een diepte tussen 0 tot 1.5 meter afwijkend kan zijn ten opzichte van metingen aan de algenmassa net onder en aan het oppervlak.

De stations TNH-1-C en TNH-2-C bevinden zich nabij of te midden van waterplanten. Daarnaast is het water nabij TNH-1-C zeer ondiep en kan de bodem zichtbaar zijn. Dit zijn punten van aandacht die bij de discussie nog terug komen.

Door GWA is bij de SIOP tochten een LICOR ter beschikking gesteld. De metingen met de LICOR waren vooraf niet gepland maar zijn wel zeer belangrijk bij de validatie van de de lichtuitdoving coëfficiënt K_d . Helaas is bij de uitwerking gebleken dat alleen de meetreeks met de LICOR op de eerste SIOP tocht is geslaagd.

De spectrale metingen van de eerste SIOP tocht bleken licht te worden beïnvloed strooilight in het blauwe en extreem rode deel van het spectrum. Dit effect is later niet meer op te treden.

2.3 Optische veldmeting met de PR-650 veldspectroradiometer

De PR-650 (Photo Research, Chatsworth, CA, USA) lijkt op een videocamera en meet radiantie binnen een hoek van 1° . Met het objectief kan nauwkeurig worden ingesteld op een doelwit. Het totale spectrum met een golflengtebereik van 380 tot 780 nm wordt in één keer opgenomen en in stappen van 4 nm weergegeven. De spectrale resolutie is 8 nm. Voorafgaand aan iedere meting wordt gecorrigeerd voor donkerstroom (interne achtergrondruis). De bijbehorende integratietijd van de metingen wordt automatisch ingesteld. Calibratie van het apparaat is door de fabrikant jaarlijks geijkt aan NIST lampen (National Institute of Standardization). Het objectief kan vervangen worden door een cosinuscollector (een lichtsensor waarmee het invallende licht onder een hoek van 180° wordt gemeten). Bij dit meetstelsel hoort een 99% reflecterende diffuse plaat gemaakt van Spectralon. De voeding komt van een oplaadbare batterij. Meer specificaties zijn te vinden op de website (www.photoresearch.com). Directe communicatie met een computer is mogelijk via een seriële (evt. USB) kabelaansluiting waardoor er binnen enkele minuten een gemeten $R(0-)$ spectrum en de afgeleide concentraties kunnen worden uitgerekend en gepresenteerd.

De opwaartse radiantie boven het wateroppervlak (L_{au} of L_{42}) en de neerwaartse radiantie van het hemellicht (L_{sky}) worden gemeten onder respectievelijk een nadir en zenithhoek van bij benadering 42° (zie Appendix II voor nadere uitleg). Deze hoek wordt gebruikt om invloed van reflectie en schaduw van de boot te vermijden. De gemeten opwaartse radiantie bevat ook het aan wateroppervlak gereflecteerde hemellicht. Voor het berekenen van de neerwaarts gerichte irradiantie (E_{ad}) en om onderscheid te maken tussen direct zonlicht en de diffuse straling, wordt de radiantie gemeten aan een gekalibreerd diffuus reflectie paneel voor (L_{rp}) en na beschaduwing van het paneel (L_{rpd}). Op grond van praktisch en theoretisch overwegingen is de meetrichting 90° in het vlak van de zon. Op deze wijze wordt zonneschittering zoveel mogelijk vermeden.

Afhankelijk van watertype en lichtomstandigheden duurt één meting in de zomer rond het middaguur ca. 0.1 tot 1 seconde. Iedere meting is in 10-voud gedaan en direct gemiddeld. De meetserie (respectievelijk L_{42} , L_{sky} , L_r en L_{rpd}) is driemaal achter elkaar uitgevoerd. Bij stabiele weers- en werkomstandigheden is de meetsessie (drie opvolgende meetseries op een meetlocatie) in minder dan 3 minuten voltooid.

2.4 Optische waterkwaliteitsparameters

Tijdens de SIOP-tochten werden gelijktijdig aan de veldspectroradiometrische metingen watermonsters genomen voor de laboratoriumanalyses. Hiertoe werden plastic (PTE) 1 L flessen vanuit de boot vlak onder het wateroppervlak gevuld en in een koelbox met koel-elementen opgeslagen. Aangekomen in het laboratorium werd zo snel mogelijk gefiltreerd en de bundelverzwakkingscoëfficiënt gemeten; de overige bepalingen werden binnen 72 uur uitgevoerd.

Chlorofyl-*a* (Chl-*a*) en faeopigment zijn spectrofotometrisch bepaald volgens het NEN-voorschrift (NEN 6520, 1981), door middel van extractie in 80% ethanol bij een temperatuur van 75 °C. De bepalingen zijn in triplo uitgevoerd.

Het drooggewicht of zwevende stofconcentratie (TSM) is bepaald na filtratie over Whatman GF/F filters en drogen bij 80 °C (NEN 6484, 1982). De asrest (ISM) is bepaald door de filters vervolgens bij 550 °C uit te gloeien. Het organisch gesuspendeerde materiaal (OSM) is gedefinieerd als TSM - ISM. De bepalingen zijn in triplo uitgevoerd.

De verticale lichtuitdoving K_d is gemeten op basis van irradiantiemetingen met een LICOR 1000 PAR meter met 2 cosinus gecorrigeerde sensoren (Li-192SA) met een onderlinge vaste afstand van 0.5 m. De metingen zijn uitgevoerd volgens het voorschrift van Rijkswaterstaat (RWS, 1998). De bovenste sensor werd net onder het wateroppervlak gehouden. De K_d van de waterkolom is berekend op basis van het gemeten benedenwaartse gericht licht op de twee diepten (Kirk, 1994):

$$\ln E_d(z_2) = - K_d z + \ln E_d(z_1) \quad (2.1)$$

2.5 Waterkwaliteitsparameters

De volgens de NEN norm gemeten chlorofyl-*a* concentratie (Chl-*a*) varieerde tussen 11 en 67 $\mu\text{g l}^{-1}$. De volgens de NEN norm gemeten totale zwevende stofconcentratie (TSM) varieerde tussen 4 en 21 mg l^{-1} . De met de LICOR *in situ* gemeten K_d varieerde tussen de 1.9 en 3.3 m^{-1} . In Tabel 2.2 zijn de gemiddelden waarden en de standaard deviaties van de waterkwaliteitsparameters per locatie en per monsterperiode weergegeven. Al de metingen zijn te vinden in de dataset op de CD-ROM (zie appendix III).

Tabel 2.2 De gemiddelde concentraties en de standaard deviaties van gemeten chlorofyl-a (Chl-a; $\mu\text{g l}^{-1}$), zwevend stof (TSM; mg l^{-1}) en de verticale lichtuitdoving (K_d ; m^{-1}). De nummers voor de stationscodes zijn de Juliaanse dagnummers (114 is 14 april, 210 is 29 juli en 255 is 12 september).

Station	Chl-a	σ CHL-a	TSM	σ TSM	Kd LICOR	σ Kd
114LEL-1-C	45	3.40	19	1.70	3.0	0.53
210LEL-1-C	21	0.90	12	0.69	-	-
255LEL-1-C	39	1.75	21	8.20	-	-
114LEL-2-C	50	5.30	18	1.13	3.1	0.06
210LEL-2-C	22	1.76	10	0.57	-	-
255LEL-2-C	38	1.93	18	1.60	-	-
114LEL-3-C	47	4.32	20	1.32	3.3	0.08
210LEL-3-C	24	2.51	17	0.64	-	-
255LEL-3-C	39	0.96	14	1.44	-	-
114TNT-1-C	29	3.11	15	0.87	3.0	0.03
210TNT-1-C	21	2.38	6	0.19	-	-
255TNT-1-C	44	3.19	17	1.97	-	-
114TNT-2-C	33	2.09	17	0.76	2.9	0.05
210TNT-2-C	23	1.19	6	0.41	-	-
255TNT-2-C	47	2.89	16	0.92	-	-
114TNH-1-C	31	0.92	9	0.12	1.9	0.01
210TNH-1-C	27	1.98	8	0.76	-	-
255TNH-1-C	21	1.76	4	1.62	-	-
114TNH-2-C	22	0.93	7	1.72	2.6	0.14
210TNH-2-C	22	1.44	8	0.70	-	-
255TNH-2-C	17	3.83	4	1.22	-	-

2.6 Inherente optische eigenschappen

Ongeveer de helft van de watermonsters, die voor de waterkwaliteitsparameters geanalyseerd zijn, werden ook geanalyseerd om de inherente optische eigenschappen van de componenten in het water vast te stellen. Spectraal analyse van wel en niet gefiltreerde watermonsters in het laboratorium levert inzicht in de optische eigenschappen van de opgeloste en particuliere bestanddelen. Deze informatie is cruciaal voor optische modellering.

De spectrale eigenschappen zijn bepaald met behulp van een Ocean Optics SD2000 spectrofotometer. De spectra zijn gemeten van 400 tot 900 nm met een stapgrootte van 1 nm. Het bundelverzwakkingsspectrum van het watermonster en het absorptiespectrum van opgeloste organische stoffen (CDOM) zijn bepaald in een 10 cm cuvet. CDOM is verkregen na filtratie over een 0,45 μm Watmann GF/F filter. De absorptiespectra van seston (alle partikels) en tripton (detritus en anorganisch materiaal) zijn bepaald via de 'filterpad' methode (Trüper and Yentsch, 1967); (Gilijamse, 1994). Bij deze methode is het watermonster in een dunne laag afgefiltreerd op een 0,45 μm Wattman GF/F filter en doorgemeten in vergelijking met een blanco filter. Voor de betrouwbaarheid van de meting, in verband met het standaardiseren van effecten van meervoudige verstrooiing, is het verkrijgen van een optische dichtheid bij 440 nm tussen 0,4 en 0,5 een voorwaarde. Dit is bereikt door iteratief aanpassen van de hoeveelheid afgefiltreerd watermonster. Het absorptiespectrum van tripton is verkregen door de pigmenten te extraheren uit het seston filter (Kishino *et al.*, 1985) met behulp van hete ethanol (80%, 75°C). De extinctie bij 750 nm is lineair van het gehele spectrum afge-

trokken, als eerste orde correctie voor restverstrooiing. Het fytoplankton spectrum is verkregen door het triptonspectrum af te trekken van het sestonspectrum.

3. Resultaten

Al de metingen van de drie SIOP-tochten worden in dit hoofdstuk verder uitgewerkt. Ten eerste worden de PR650 metingen gecombineerd om te komen tot spectra van $R(0-)$, de theoretische reflectiewaarde net onder het wateroppervlak. Deze stap vindt automatisch plaats in de OTM-tool. Vervolgens wordt kort de ingegaan op het type algoritme dat wordt toegepast en worden voor de chlorofyl-a, zwevende stof en doorzicht een algoritme afgeleid. Tenslotte worden de in-situ metingen en spectrale metingen vergeleken.

3.1 Uitwerking van de reflectiemetingen

De berekening van het onderwater reflectie spectrum is als volgt (vgl. 3.1):

$$R(0-) = \frac{Qf(L_{au} - r_{sky}L_{sky})}{[E_{ad} - r_{\Theta}(1-F)E_{ad} - r_{dif}FE_{ad}] + (0.48E_{wu})} \quad (3.1)$$

waarbij:

Q	= de omzettingscoëfficiënt voor L_{wu} in E_{wu}
f	= de omzettingscoëfficiënt voor L_{au} in L_{wu}
L_{au}	= de opwaartse radiantie boven het water bij een nadirhoek van 42°
L_{sky}	= de radiantie van het hemellicht bij een zenithhoek van 42°
r_{sky}	= de Fresnel reflectiecoëfficiënt bij een zenithhoek van 42°
E_{ad}	= de neerwaartse irradiantie vlak boven water
r_{Θ}	= de Fresnel reflectiecoëfficiënt voor zonlicht
r_{dif}	= de Fresnel reflectiecoëfficiënt voor diffuus licht
F	= de fractie diffuus licht van E_{ad}
E_{wu}	= de opwaartse irradiantie vlak onder het wateroppervlak.

De volgende omzettingswaarden zijn gebruikt:

Voor f word de waarde 1.82 voor zoet water (Dekker, 1993) gebruikt. Als Fresnel reflectiecoëfficiënt r_{dif} is de waarde 0.06 (Jerlov, 1976) gebruikt. De Fresnel reflectiecoëfficiënt voor zonlicht r_{Θ} is berekend op grond van de zenithhoek van de zon. De neerwaartse irradiantie E_{ad} is verkregen door radiantie metingen aan een gekalibreerd reflectiepaneel (Spectralon 100 %). Wanneer de neerwaartse lichtinstraling dermate hoog was, dat er een interne overflow optrad werd er gewerkt met een (gekalibreerd) neutraal filter voor de lens, waarbij de lichtdoorlaatbaarheid ca. 10 % van het totaal bedraagt. De fractie diffuus licht (F) is de ratio tussen E_{ad} metingen verkregen met het reflectiepaneel voor (L_{rp}) en na beschaduwing (L_{rpd}). Voor meer achtergrond over deze berekening verwijzen we naar appendix II.

3.2 Algoritme ontwikkeling

Door middel van algoritmen wordt de reflectie $R(0-)$, gemeten via optische teledetectie, gerelateerd aan de diverse waterkwaliteitsparameters. De reflectiespectra van de SIOP tochten zijn weergegeven in de figuren C1 – C3 van appendix I. Duidelijk is te zien dat de spectra soms sterk overeenkomen en soms in vorm en hoogte verschillen. Er zijn tal van algoritmen ontwikkeld om deze reflectiespectra om te zetten naar waarden voor CHL, TSM en CDOM.

In een omgeving waarbij de omzetting routinematig en zonder veel additionele testmetingen dient plaats te vinden is het aan te raden de algoritmen te baseren op vooral de verhouding van de $R(0-)$ waarden bij een beperkt aantal golflengten. Deze verhoudingen dienen dan ook vrij ongevoelig te zijn voor meetfouten die kunnen optreden bij sterk wisselende licht-omstandigheden.

In deze studie is voor de chlorofyl-*a* concentratie en de K_d -metingen uitgegaan van de algoritmen van Gons (1998; 1999) ontwikkeld voor relatief ondiepe, eutrofe wateren zoals het IJsselmeergebied. In dit geval wordt een optisch model opgesteld, gebaseerd op SIOP metingen en gebruikt om een combinatie van spectrale banden aan te wijzen die geschikt zijn voor de herkenning van CHL of K_d . Deze banden worden samengevoegd tot een spectrale indicator, waaraan, meestal door regressietechnieken, een relatie gekoppeld wordt met gemeten concentraties of onafhankelijk bepaalde waarde van de K_d . In deze studie zijn de algoritmen met behulp van multiple regressie geoptimaliseerd (zie ook Rijkeboer *et al.*, 1999).

3.3 Algoritme voor chlorofyl-*a*

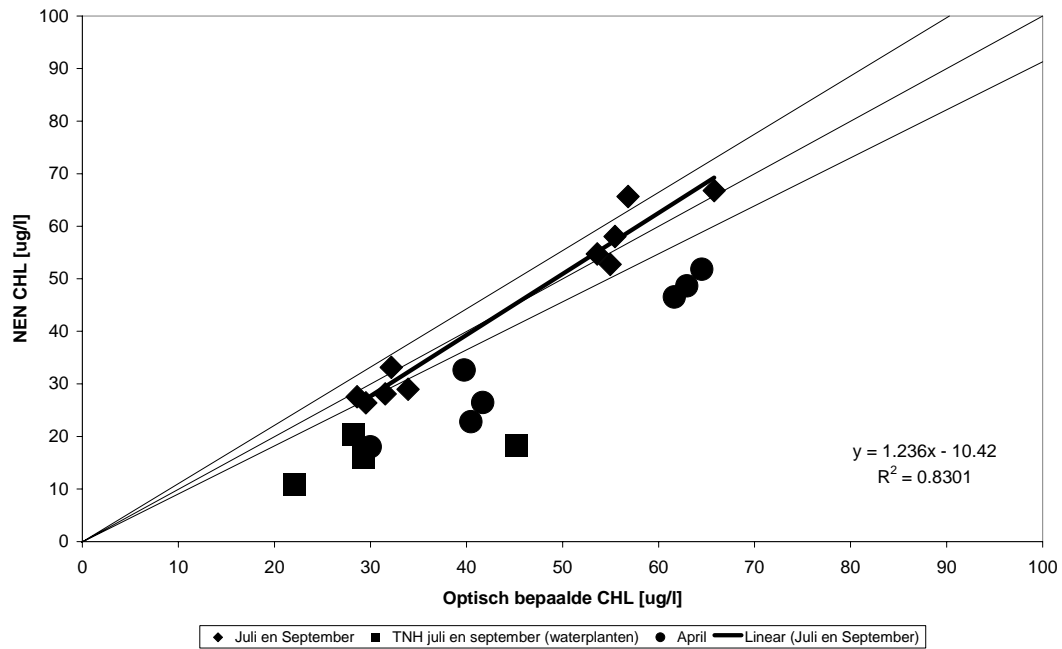
Het algoritme voor de chlorofyl-*a* concentratie is ontwikkeld en gekalibreerd met behulp van reflectiespectra verkregen met de PR-650 veldspectroradiometer, op basis van een groot aantal waarnemingen uit de diverse seizoenen en jaren in het IJsselmeer. Het algoritme is met een onafhankelijke dataset voor ondiepe, troebele wateren gevalideerd en in de vakliteratuur beschreven (Gons, 1999)

$$Chl\ a = \frac{\left(\frac{R(0-)_704}{R(0-)_672} \right) \left[(a_{w704} + b_{b776}) - a_{w672} - b_{b776}^p \right]}{a_{672}^*} \quad (3.2)$$

De formulering is gebaseerd op de te verwachten bijdragen van absorptie en verstrooiing bij de golflengte 672, 704 en 776 nm. In vergelijking 3.1 zijn a_{w704} en a_{w672} de water absorptie bij de respectievelijke golflengtes, b_{b776} de terugverstrooiingscoëfficiënt bij 776 nanometer, p een constante en a_{672}^* de chl-*a* specifieke absorptie coëfficiënt. Deze waarde van a_{672}^* is een variabele die onder andere afhangt van de gemiddelde Chl-*a* waarde en de groeiomstandigheden. De p is in dit onderzoek niet meegenomen aangezien deze in recente literatuur niet meer wordt toegepast (Ruddick *et al.*, 2000). Verder is bij dit onderzoek de terugverstrooiingscoëfficiënt bij 700 nanometer gebruikt in verband met strooilicht artefacten in de spectra van april. Uit de regressie op de GWA data komen de volgende waarden voor a_{w704} , a_{w672} en a_{672}^* : $0.6303\ m^{-1}$, $0.415\ m^{-1}$ en $0.014\ m^2\ mg^{-1}$. De afgeleide waarde is overeenkomstig de waarden die door Bricaud *et al.* (1995) werden gevonden.

Figuur 3.1 presenteert de relatie tussen de op basis van de reflectie voorspelde chlorofyl-*a* waarden en de volgens het NEN-voorschrift gemeten chlorofyl-*a* concentratie in de watermonsters. De interpretatie van de resultaten zijn in eerste instantie teleurstellend door de grote spreiding in de data. Bij toepassing van de algoritmen, die eerder zijn ontwikkeld voor een type water dat lijkt op de GWA wateren (STOWA, 2001), blijkt dit relatie slecht. De oplossing lijkt te liggen in twee factoren:

- Waterplanten en bodemzicht (vierkantjes) zijn met de huidige methode problematisch bij het afleiden van CHL-a concentratie in het water. De punten bij het heldere deel van Terra Nova (juli, september) nemen we niet op in de regressie.
- Metingen gedaan in april (rondjes) hadden problemen met strooilicht bijdrage in de spectra die een verhoging geven van het R(0-) spectrum bij 776 nm. Er wordt gewerkt aan een oplossing om bij andere golflengte de ratio algoritmen uit te werken om dit strooilicht te omzeilen. Voorlopig worden deze punten (rondjes) ook niet meegenomen.



Figuur 3.1 De optisch bepaalde Chlorofyl-a concentratie uitgezet tegen de gemeten concentratie volgens de NEN-norm. De getrokken lijn geeft de 1 op 1 verhouding aan. Boven en onder de 1:1 lijn zijn twee lijnen getrokken die de 10% afwijking aangeven.

Voor de overige metingen (gesymboliseerd door de ruiten in figuur 3.1) werd een goede relatie gevonden tussen de gemodelleerde Chlorofyl-a en de gemeten Chlorofyl-a ($R^2 = 0.83$). Deze relatie benadert de 1:1 verhouding.

De variatie in de optisch bepaalde Chl-a concentratie wordt gegeven door de gemiddelde standaarddeviatie over alle metingen, welke als volgt is berekend (met M het aantal vrijheidsgraden):

$$\sigma^2 = \frac{1}{N - M} \sum_{i=1}^N [y_i - y(x_i)]^2 \quad (3.3)$$

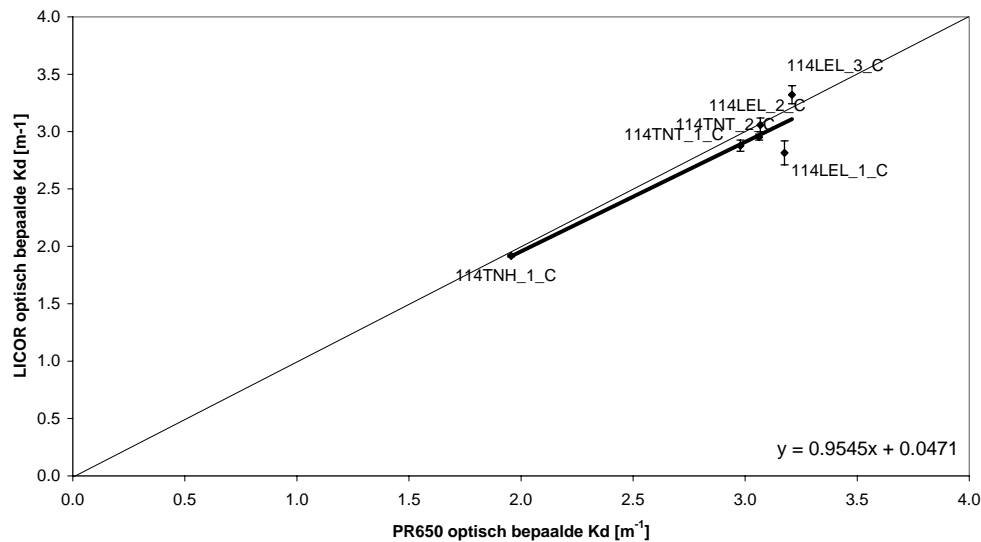
De standaard deviatie σ bedroeg $5.2 \mu\text{g l}^{-1}$, hetgeen in de orde is van 10% van de Chl-a concentratie. De gemiddelde standaarddeviatie van de volgens de NEN-norm gemeten Chl-a concentratie bedroeg $2.3 \mu\text{g l}^{-1}$. De relatieve fout komt overeen met de fout die wordt ge-

vonden bij het afregelen van een Chl-a algoritme in eutrofe grote veenplassen, te weten $8 \mu\text{g l}^{-1}$ voor een dataset van 70 metingen in het gebied 3 tot $99 \mu\text{g l}^{-1}$ (STOWA, 2001).

3.4 Algoritme voor verticale lichtuitdoving (K_d)

Voor de verticale lichtuitdoving werd als uitgangspunt het semi-empirisch algoritme van Gons (et al., 1998) gebruikt, oorspronkelijk gekalibreerd met behulp van data uit het IJsselmeergebied. Op de spectrale data ($N=7$) van 24 april is multiple lineaire regressie uitgevoerd om de parameters van het Gons algoritme aan te scherpen voor gebruik in de ondiepe eutrofe plassen Loenderveen en Terra Nova. Bij de analyse bleek de invloed van het meetpunt TNH-2-C zeer groot te zijn op de uitkomst van regressie en variantie. Op diverse gronden is aannemelijk te maken dat zowel PR650 en LICOR metingen ernstig worden beïnvloed door de nabijheid van waterplanten. Dit meetpunt is niet meegenomen in de verdere analyse ($N=6$). De relatie tussen de K_d en drie bepalende reflectie ratios is gegeven in vergelijking 3.4. Hiervoor werden de K_d metingen die *in situ* waren uitgevoerd m.b.v. een LICOR als standaard genomen.

$$K_d = 3.23 \left[\frac{R(0-)_{700}}{R(0-)_{572}} \right] + b_{b766} - 0.18 \left[\frac{R(0-)_{672}}{R(0-)_{776}} \right] + 1.36 \left[\frac{R(0-)_{440}}{R(0-)_{572}} \right] \quad (3.4)$$



Figuur 3.2 De optisch bepaalde lichtuitdoving onderwater (K_d) en de in situ gemeten lichtuitdoving. De getrokken lijn geeft de 1 op 1 verhouding aan. Voor de LICOR metingen is de standaarddeviatie per punt aangegeven.

De relatie tussen de gemeten K_d en optisch bepaalde K_d levert de volgende lineaire relatie op: gemeten $K_d = 0.95 * \text{optisch bepaalde } K_d + 0.05$. Deze relatie benadert de 1:1 verhouding en kent een R^2 van 0.89.

De standaarddeviatie van de optisch bepaalde K_d is 0.12 m^{-1} . De standaarddeviatie van de LICOR metingen is gemiddeld 0.05 m^{-1} . Indien de meting bij het heldere deel van Terra Nova wordt meegenomen schuift de standaarddeviatie naar 0.2 m^{-1} . in de figuur 3.2 zijn

twee zaken op te merken. Ten eerste betreft het slechts de meetreeks van de eerste SIOP tocht met maar zes punten, dit terwijl er toch vier fitparameters zijn. Dit resultaat dient dringend te worden gevalideerd met een extra set van simultane PR650 en LICOR metingen. Ten tweede is het bereik van de K_d zeer beperkt in dynamiek, zodanig dat de lineaire fit niet sterk wordt vastgelegd. Bij een nieuwe meetreeks is hopelijk een grotere dynamiek aanwezig in het systeem.

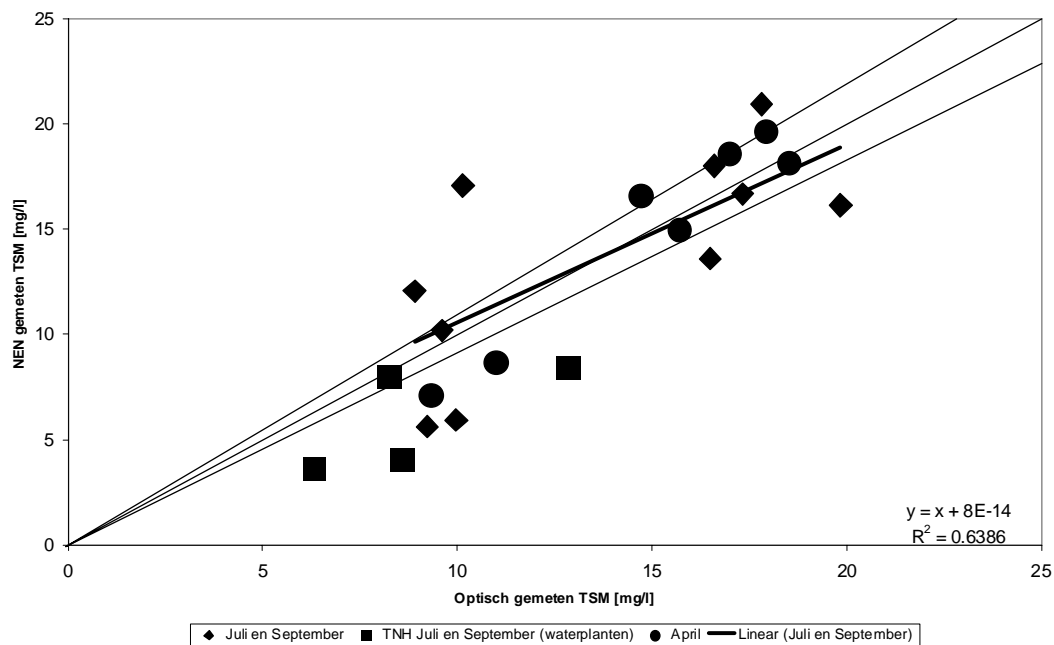
3.5 Algoritme voor totaal zwevend stof (TSM)

Voor het bepalen van zwevend stof word veelal gebruik gemaakt van een éénbandsalgoritme gebaseerd op de reflectie bij 704 nm. Een dergelijk éénbandsalgoritme kan echter robuuster gemaakt worden door een combinatie te nemen van het éénbandsalgoritme en een bandratio, waarbij gecorrigeerd kan worden voor veranderende chlorofyl-a concentratie. Hiervoor werd gebruik gemaakt van de bandratio die Gons afgeleid heeft voor chlorofyl-a.

Na regressie op de spectrale data van 24 april en 29 juli ($N=14$) werden de parameters van het algoritme als volgt ingevuld:

$$TSM = 11.7 \left(\frac{R(0-)_{704}}{R(0-)_{672}} \right) + 115.4 R(0-)_{704} - 8.5 \quad (3.5)$$

De op basis van dit algoritme gemodelleerde TSM waarden zijn in figuur 3.3 uitgezet tegen de volgens het NEN voorschrift gemeten TSM waarden.



Figuur 3.3 De gemodelleerde TSM concentratie uitgezet tegen de volgens de NEN-norm gemeten TSM concentratie. De middelste getrokken lijn geeft de 1 op 1 verhouding aan; daarboven en daar onder zijn de 1:0.9 en 1:1.1 lijnen getekend.

Er is sprake van een lineaire relatie tussen de gemodelleerde TSM waarden en de aan watermonsters gemeten waarden (R^2 van 0.64). Deze relatie volgt de 1:1 verhouding. De standaarddeviatie (zie vergelijking 3.2) voor de gemodelleerde range van 6 tot 20 mg l^{-1} bedraagt 3.2 mg l^{-1} . De standaarddeviatie van de NEN TSM bepalingen bedraagt 0.8 mg l^{-1} . De metingen vertonen een behoorlijke spreiding die, naast de beperking in de meetmethode ook lijkt te duiden op een intrinsiek variatie in tripton waarden binnen de plassen, of zelfs op variatie op een schaal van meters rond de boot.

3.6 Discussie

De algoritmes voor Chl-*a*, K_d en TSM zijn afgeleid op basis van de *in situ* metingen die zijn verricht op 24 april, 29 juli en 12 september. De wateren Loenderveen en Terra Nova kunnen op grond van hun spectrale eigenschappen worden ingedeeld bij watertype IV zoals omschreven door STOWA (2001). De dynamiek in Chl-*a* in de STOWA dataset (20-200 $\mu\text{g l}^{-1}$) is echter veel groter dan de dynamiek in de Chl-*a* waarden (20-50 $\mu\text{g l}^{-1}$) voor Loenderveen en Terra Nova. Dit heeft een nadelig effect op het vaststellen van het algoritme. Figuur 3.1 laat zien dat de hellingshoek van de relatie tussen de optisch bepaalde Chl-*a* en de volgens de NEN-norm wel de 1:1 verhouding benaderd.

De gemiddelde standaarddeviatie van de metingen is 5.2 $\mu\text{g l}^{-1}$ bij een gemiddelde chl-*a* waarde van 36 $\mu\text{g l}^{-1}$. De standaarddeviatie van de NEN Chl-*a* concentratie bepalingen van de validatie set is kleiner (2.3 $\mu\text{g l}^{-1}$). Hierbij moet worden opgemerkt dat de OTM waarden steeds zijn afgezet tegen de NEN-waarden. Deze chlorophyll-*a* metingen volgens NEN normen zijn echter ook onzeker. In een recent ringonderzoek naar chlorophyll-*a* waarden gemeten in oppervlaktewater door 23 laboratoria (RWS, 2002) worden behoorlijke afwijkingen gevonden. Dit blijkt dat voor een set (Job 3) met vergelijkbare chlorophyll-*a* waarden (gemiddeld 60 $\mu\text{g l}^{-1}$) de laboratoria intrinsiek een herhaalbaarheid (triplo's) van 4,82 $\mu\text{g l}^{-1}$ halen, maar dat de reproduceerbaarheid slechts 8,84 $\mu\text{g l}^{-1}$ bedraagt.

Resumerend kan gesteld worden dat *in situ* gemeten $R(0-)$ waarden met de PR-650 redelijk betrouwbaar omgezet kunnen worden in een Chlorofyl-*a* concentratie met behulp van het Chl-*a* algoritme van Gons (1999), licht aangepast overeenkomstig de bevindingen die voor een grotere set optische metingen zijn afgeleid door Rijkeboer voor STOWA (2001).

De gemiddelde standaarddeviatie van de set OTM metingen van TSM is 3 mg l^{-1} . De standaarddeviatie van de NEN TSM bepalingen van de validatie set bedraagt 2.4 mg l^{-1} . Voor de STOWA studie werd voor vergelijkbare wateren in het interval 7 tot 37 mg l^{-1} een standaarddeviatie gevonden van vergelijkbare 6 mg l^{-1} . Het huidige type algoritme kent dus een limiet in zijn nauwkeurigheid die minder is dan de NEN-normen.

Wat betreft de verticale lichtuitdoving lijkt de PR650-methode zeer geschikt is voor K_d metingen in Loenderveen en Terra Nova, met uitzondering van gebieden met hoge dichtheid van waterplanten. De K_d waarden uit het algoritme voor de eerste SIOP-tochten vallen in dezelfde range als de LICOR metingen met een geringe meetfout (0.12 m^{-1}). Net als bij de Chl-*a* waarden is ook de dynamiek in de K_d metingen beperkt. Verder kunnen wederom vanwege het kleine aantal LICOR-metingen geen uitspraken gedaan worden over eventuele lokale of seizoensgebonden variatie. Het is aan te raden een additionele set van gelijktijdige LICOR en PR650 metingen te verzamelen voor verdere validatie.

4. Conclusies en aanbevelingen

4.1 Toetsing van de OTM-tool algoritmes

In dit rapport zijn de resultaten beschreven die zijn verzameld in de Loenderveense plas en de petgaten bij Terra Nova in 2002. Deze resultaten dienen ter bij de voorbereiding en van het mogelijk operationeel gebruik van een PR650 veldspectroradiometer voor het routinematig bepalen van met name de extinctiecoëfficiënt en chlorofyl-*a*.

De chlorofyl-*a* concentraties berekend op grond van PR-650 metingen vertoonden een goede overeenkomst met de volgens het NEN-voorschrift gemeten concentraties. Het algoritme voor de schatting van lichtuitdoving onderwater gaf redelijk betrouwbare waarden. De standaardfout van de schatting van de gemodelleerde waarde ten opzichte van de gemeten waarde was voor beide waterkwaliteitsparameters klein. Klein is hier opgevat als van de zelfde orde als de onzekerheid in die is vastgesteld voor de traditionele NEN-norm bepaling. Opvallend was wel dat met name het Chl-*a* algoritme minder goed presteerde bij de metingen in Terra Nova. Dit kan worden verklaard door de aanwezigheid van waterplanten en of bodemzicht op deze locaties.

Voor Loenderveen en het troebele deel van Terra Nova kan worden volstaan worden met één algoritme per variabele. Deze algoritmen kunnen worden geïmplementeerd in de OTM-tool. De relatie voor K_d dient eerst nog met een additionele meetset te worden bevestigd.

4.2 Voordelen van de OTM-tool

In dit project is door middel van de zogenaamde ‘spectra-tochten’ een monitoring van de GWA-plassen uitgevoerd. In de praktijk blijkt het dat tot 20 bepalingen per dag kunnen worden uitgevoerd. Dit betekent een winst in de het meten van Chl-*a* en K_d in klein gebied en dus meer inzicht in ruimtelijke variabiliteit.

De uitkomsten kunnen vrijwel online met de OTM-tool berekend en getoond worden. Dit houdt in dat, afhankelijk van de resultaten, het monitoren van de plassen ter plaatste kan worden bijgesteld en verbeterd. Er kan onder vrijwel alle weersomstandigheden gewerkt worden, mits de meetmethode snel genoeg is om effecten van wisselende bewolking te minimaliseren. De methode is reproduceerbaar en kan zonder specialistische kennis verder worden gebruikt.

Implementatie van de beschreven optische teledetectie methode (OTM) door GWA betekent op de korte termijn een snelle, goedkope en robuuste meetmethode die inzicht geeft in de ruimtelijke variatie van optische waterkwaliteitsparameters in de betreffende monitoringgebieden. Direct aansluitend aan de monstertocht kunnen de waterkwaliteitsparameters van een groot aantal monsterlocaties uitgelezen worden. O.a. het nemen van grote hoeveelheden *in situ* monsters die in het laboratorium geanalyseerd moeten worden, kan op deze wijze vermeden worden. De verkregen informatie is digitaal en kan ingebracht worden als informatielaag in een Geografisch Informatie Systeem (GIS) en gebruikt worden in een Be-slissing Ondersteunend Systeem (BOS).

4.3 (Huidige) beperkingen

De methode is van toepassing bij onderzoek van al het oppervlaktewater. De methode kan gebruikt worden vanuit een boot, brug, dam of steiger indien de directe omgeving voldoende open is met betrekking tot het invallende hemellicht (geen dichte begroeiing met waterplanten). Tevens dient de diepte ter plekke van de meting het doorzicht te overschrijden.

De OTM registreert in principe alleen het signaal afkomstig uit de eufotische laag van de waterkolom waarin 90 % van het licht gereflecteerd wordt. Dit betekent dat de afgeleide waterkwaliteitsparameters geldig zijn voor dat deel van de waterkolom. Deze methode levert geen informatie op over de verticale verdeling van de waterkwaliteitsparameters. De horizontale verdeling wordt uiteraard wel correct geregistreerd. (N.B.: Binnen het meetveld van de PR-650 en dat is circa 0,2 m² oppervlak.) Op deze wijze zijn ook algendrijflagen goed te registreren.

De OTM-tool gaat ervan uit dat reflectiespectra worden afgeleid uit metingen die onder een hoek van bij benadering 42 graden naar het oppervlaktewater wordt gemaakt. Dit valt niet mee in een wiebelend bootje. Het is aan te raden op termijn een inclinometer op de PR650 te installeren om de juiste hoek te helpen bepalen.

De OTM is in principe alleen geschikt voor het afleiden van optische waterkwaliteitsparameters.

De OTM methode is toepasbaar onder verschillende weertypes, alhoewel het beste resultaat bij mooi weer (zonnig, wolkloos en windstil) verkregen wordt. Ook worden goede resultaten geboekt wanneer het volledig bewolkt is (alleen diffuus licht). Bij wisselende bewolking (en dus wisselende lichtomstandigheden) kan het lastig zijn een hele meetserie (water, lucht, paneel) onder dezelfde lichtomstandigheden te meten, hetgeen vereist is. Extra meetseries kunnen dan uitkomst bieden. Bij regen is de OTM methode sowieso niet toepasbaar. Momenteel bevat de OTM-tool nog geen test op de mogelijke invloed van wisselende lichtomstandigheden. Het opnemen van een dergelijke test heeft het voordeel dat ter plaatse een extra opname gemaakt kan worden om een goed reflectiespectrum te verzamelen.

4.4 Aanbevelingen

Het verdient de aanbeveling om volgend seizoen wederom optische metingen met de PR650 te verrichten in Loenderveen en Terra Nova, en de algoritmes te gebruiken die zijn ontwikkeld binnen het GWA-CDOM project om opnieuw waterkwaliteitsparameters te monitoren. Deze nieuwe dataset kan dan worden gebruikt om de algoritmes te valideren en eventueel te verbeteren.

Vanwege het kleine aantal referentiemetingen voor de verticale lichtuitdoving is het nodig de betrouwbaarheid van het K_d algoritme verder vast te stellen. Een belangrijke aanbeveling is dan ook het uitvoeren van meerdere *in situ* metingen met de PR650 en volledig volgens “Rijkswaterstaat voorschrift” uitgevoerde LICOR meting.

Het opstellen van een betrouwbaar algoritme voor de concentratie blauwalgen (op basis van het pigment cyanofycocyanine) is wellicht in de nabije toekomst mogelijk. Steef Peters (IVM, persoonlijke communicatie) heeft een voorbeeld van een dergelijk algoritme gepresenteerd op een bijeenkomst op het NIOO-CL op 4 oktober jongstleden. Aanbevolen wordt nu dan ook om een blauwalgen algoritme te ontwikkelen voor Loenderveen en Terra Nova.

De reflectiespectra van de tochten van dit project laten duidelijke blauwalgen-pieken zien (zie figuren in appendix I).

Gezien de beïnvloeding van de Chl-*a* concentratie door waterplanten is het van belang om maatregelen in het meetprotocol van de PR650 op te nemen teneinde goede spectrale metingen te verkrijgen. Nader onderzoek is hiervoor gewenst.

Om de GWA in staat te stellen daadwerkelijk gebruik te maken van de PR650 methode is het noodzakelijk om kennis over te dragen. Hierbij kan worden gedacht aan een instructie in het gebruik van software die benodigd is om PR650 metingen uit te lezen, te verwerken en te interpreteren (zoals de OTM tool).

5. Literatuur

- AquaSense (1999). *Fycobilinepigment-analyses 1999*. In opdracht van Rijkswaterstaat-Dir. IJssel-meergebied. Rapportnummer: 99.1440.
- Austin, R.W. (1980). Gulf of Mexico, ocean-color surface-truth measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 18, (3), 269-285.
- Buiteveld, H. (1995). A model for calculation of diffuse light attenuation (PAR) and secchi depth. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 29, (1), 55-65.
- Bricaud, A. et al. (1995). Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization (Paper 95JC00463). *Journal of Geophysical Research*, 100, 13321-13332.
- Bukata, R.P., Jerome, J.H. & Bruton, J.E. (1988). Particulate concentrations in Lake St. Clair as recorded by a shipborne multispectral optical monitoring system. *Remote Sens. Environ.*, 25, 201-299.
- Dekker, A.G. (1993). *Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing*. PhD. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands, 240 p.
- Dekker, A.G., Zamurovic-Nenad, Z., Hoogenboom, H.J. & Peters, S.W.M. (1996). Remote sensing, ecological water quality modelling and in situ measurements: a case study in shallow lakes. *Hydrol. Sci. J.*, 41 (4), 531-547.
- Dekker, A.G., Moen, J.P., Kootwijk, E.J., Rossum, G. van, Hoogenboom, H.J., Belfroid, A.C. & Claassen, T.H.L. (1999). *De kwaliteit van enkele Friese binnenwateren gemeten met vliegtuig-remote sensing (augustus 1997)*. NRSP-2, 99-02, Delft, 1-101.
- Gilijamse, L.I. (1994). *Absorptiecoëfficiënten van de fytoplankton en tripton in enkele Nederlandse meren*, NIOO, Nieuwersluis, 53 pp.
- Gons, H.J. (1999). Optical teledetection of chlorophyll a in turbid waters. *Environmental Science Technology*, 33 (7), 1127-1132.
- Gons, H.J., Ebert, J. & Kromkamp, J. (1998). Optical teledetection of the vertical attenuation coefficient for downward quantum irradiance of photosynthetically available radiation in turbid waters. *Aquat. Ecol.*, 31, 299-311.
- Gordon, H.R., Brown, O.B. & Jacobs, M.M. (1975). Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean. *Appl. Opt.*, 14 (2), 417-427.
- Jerlov, N.G. (1976). *Marine Optics*, Amsterdam, the Netherlands.
- Kirk, J.T.O. (1994). *Light & photosynthesis in aquatic ecosystems*, 2 ed., 509 pp.
- Kishino, M., Takahashi, M., Okami, N. & Ichimura, S. (1985). Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea. *Bull. Mar. Sci.*, 37 (2), 634-642.
- Krijgsman, J. (1994). *Optical remote sensing of water quality parameters: interpretation of reflectance spectra*. PhD. Thesis, Delft University Press, Delft University of Technology; 198 pp.
- Liere, L. van, (1979). *On Oscillatoria agardhii Gomont; experimental ecology and physiology of nuisance bloom-forming cyanobacterium*. PhD. Thesis, University of Amsterdam, Amsterdam.
- McNiel, G.T. (1977). Metrical fundamentals of underwater lens systems. *Optical Engineering*, 16, 128-139.
- NEN 6484 (1982). Water: Determination of the content of not dissolved material and its ignition residue. *Nederlandse Norm*.
- NEN 6520 (1981). Water: Spectrophotometric determination of chlorophyll a content. *Nederlandse Norm*.

- Rijkeboer, M., Dekker, A.G. & Gons, H.J. (1998). Subsurface irradiance reflectance spectra of inland waters differing in morphometry and hydrology. *Aquat. Ecol.*, 31, 313-323.
- Rijkeboer, M., Dekker, A.G., & Kokke, J.M.M. (1997). *Kleurmetingen van Nederlandse oppervlaktewateren*, NRSP-2 96-14, BCRS-PB, Survey Department, Rijkswaterstaat, Delft, The Netherlands, 57 pp.
- Rijkeboer, M., Pasterkamp, R. & Peters, S. (1999). *Vorbereidende Studie voor de implementatie van een spectroradiometrische veldmethode voor het monitoren van optische waterkwaliteitsparameters*, IVM report O-99/09, Amsterdam.
- Ruddick, K.G., Gons, H.J., Rijkeboer, M. & Tilstone, G. (2000). *Chlorophyll-a retrieval in case 2 waters using an adaptive two-band algorithm (CRAT) with hyperspectral data*. Ocean Optics XV, Monaco.
- RWS (1998). Rijkswaterstaat voorschriften; Bepaling van de extinctiecoëfficiënt-veldmeting, *RIKZ nr. 923.00.W012*.
- RWS (2002). Rijkswaterstaat werkdocument; Laboratoriumevaluerend onderzoek, project 242 – chlorophyll-a in Oppervlaktewater – 03 september 2002; *RIZA werkdocument 2002.013x*.
- STOWA, (2001). *Optische teledetectie - Algoritmen voor het bepalen van de concentratie chlorofyll-a en zwevend stof*. STOWA-rapport 2001-05, Zoetermeer.
- Trüper, H.G. & Yentsch, C.M. (1967). Use of glass fiber filters for the rapid preparation of in vivo absorption spectra of photosynthetic bacteria. *J. Bact.*, 94, 1255-1256.
- Vos, R.J., Peters, S.W.M. & Rijkeboer, M. (1999). *Validation and error analysis of retrieval of water quality parameters from field spectra of inland waters*. IVM report W-99/48, Amsterdam.

Appendix I. Kaarten, tabellen en figuren

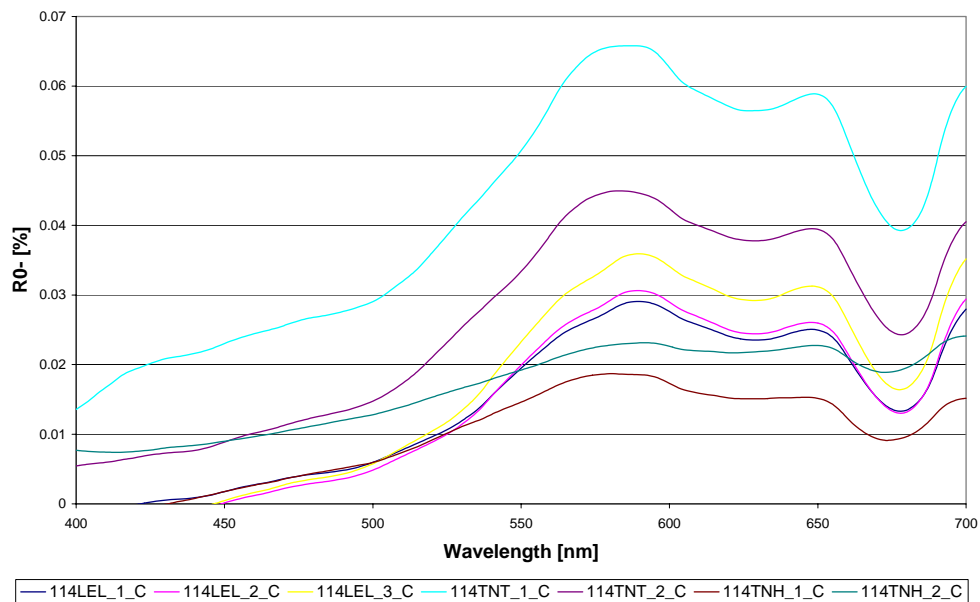
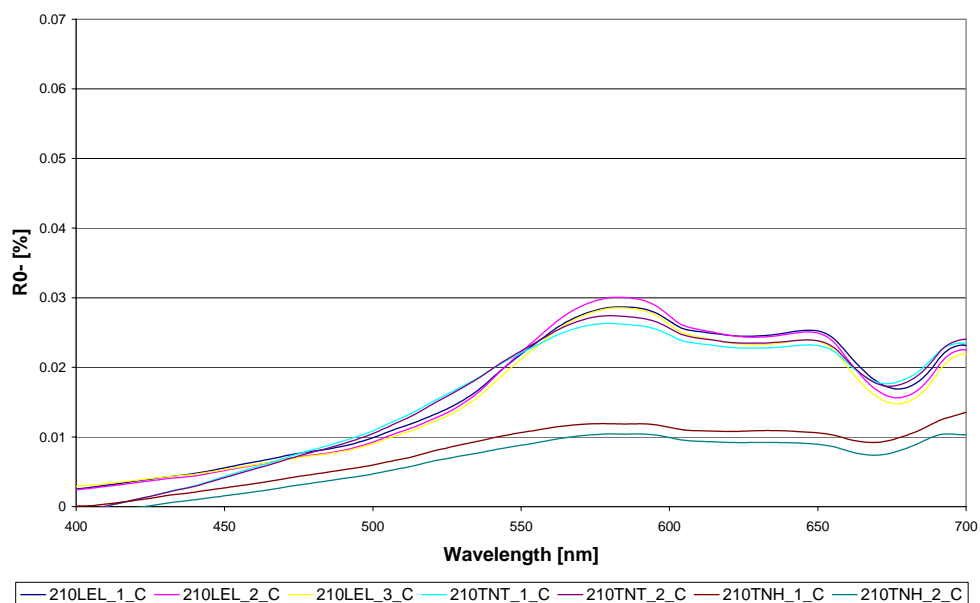
A. Kaart van de meetstations in Loenderveen en Terra Nova.

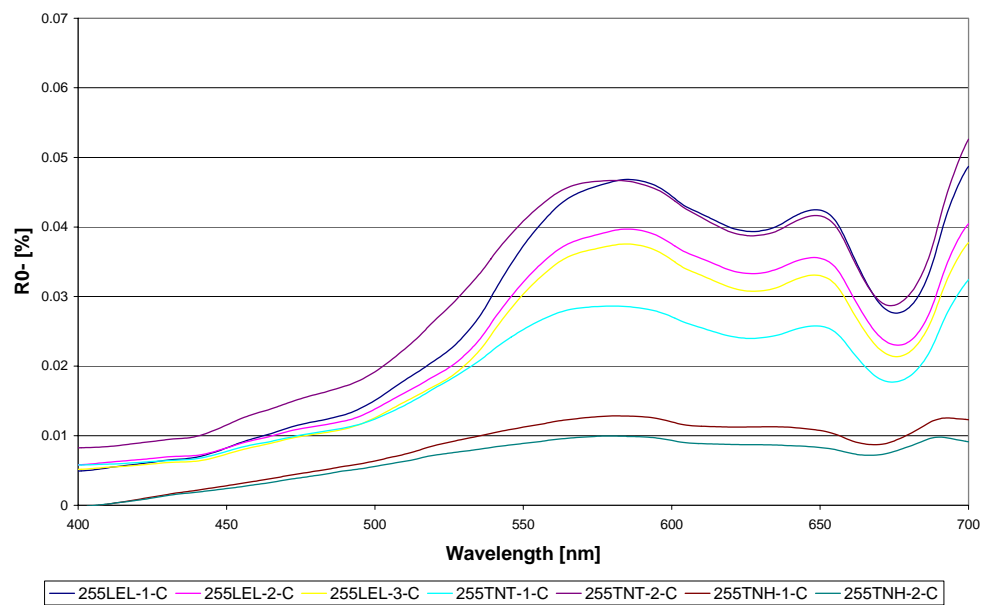


B. Optische en labmetingen waterkwaliteitsparameters.

Optische en controlemetingen waterkwaliteitsparameters voor de SIOP locaties en velddata. Voor elke meting zijn vermeld de gemiddelde waarden die zijn afgeleid met de spectroradiometrische methode (PR650), in het laboratorium volgens de NEN bepalingen (NEN) en in het veld met de LICOR. De eenheden zijn Chlorofyl-a [$\mu\text{g l}^{-1}$], TSM [mg l^{-1}] en K_d [m^{-1}]. Een overzicht van alle metingen is te vinden op de CD, zoals beschreven in Appendix I.C.

Station	Metingen					
		PR650		NEN		LICOR
	CHL-a	TSM	K_d	CHL-a	TSM	K_d
114LEL-1-C	45	18	3.1	48	19	3.0
210LEL-1-C	21	9	2.4	28	12	-
255LEL-1-C	39	18	3.1	53	21	-
114LEL-2-C	50	19	3.1	48	18	3.1
210LEL-2-C	22	9	2.2	28	10	-
255LEL-2-C	38	17	3.1	55	18	-
114LEL-3-C	47	19	3.2	51	20	3.3
210LEL-3-C	24	10	2.3	29	17	-
255LEL-3-C	39	16	3.0	58	14	-
114TNT-1-C	29	16	2.6	30	15	3.0
210TNT-1-C	21	9	2.6	26	6	-
255TNT-1-C	44	17	3.3	67	17	-
114TNT-2-C	33	15	2.8	34	17	2.9
210TNT-2-C	23	10	2.5	33	6	-
255TNT-2-C	47	20	3.3	66	16	-
114TNH-1-C	31	11	2.2	24	9	1.9
210TNH-1-C	27	10	3.3	18	8	-
255TNH-1-C	21	9	3.1	16	4	-
114TNH-2-C	22	8	2.7	19	7	2.6
210TNH-2-C	22	8	2.8	20	8	-
255TNH-2-C	17	6	2.5	11	4	-

C. Overzicht van gemeten R(0-) spectra op de SIOP tochten*Figuur I.1 R(0-)spectra genomen op 24 april 2002.**Figuur I.2 R(0-)spectra genomen op 29 juli 2002.*



Figuur I.3 R(0-)spectra genomen op 12 september 2002.

D. Beschrijving van de GWA-CDOM dataset CDROM

Op de CDROM staan alle meetgegevens, ook van parameters die niet in het rapport zijn opgenomen. De data is gegroepeerd per meetdag, dus 3 SIOP-directories en 5 spectra-directories. Elke meetdag heeft een ‘foto’-directory met daarin opnames van de digitale camera, genomen tijdens de metingen (op 16 mei, 5 en 26 juni was de digitale camera niet beschikbaar). Verder heeft ook elke meetdag een ‘PR650’-directory met daarin de GWA-tool met spectra (GWATOOL_ddmmm.xls), en een subdirectory ‘Raw’ met de ruwe data (in PR650 of matlab formaat). Tenslotte hebben de SIOP-velddagen ook een SIOP-directory met daarin alle metingen:

Soort	naam
Bundelverzwakking en terugverstrooiing	c.xls
CDOM cuvette	CDOM.xls
CDOM PSICAM (niet bij 24 april)	CDOM_PSICAM
Chlorofyl NEN, pheapigment en chl-a HPLC	Chl.xls
Seston, tripton en phytoplankton volgens filterpadmethode	FP.xls
TSM NEN	TSM.xls

De metingen zijn verwerkt mbv gestandaardiseerde excel-werkbladen. De formules etc. in de werkbladen worden hier niet uitgelegd, dit kan uiteraard in overleg.

Onder de subdirectory ‘OO-RAW’ staan de ruwe datafiles van de spectrometer.

Appendix II. Het meten van de kleur van water

A. De kleur van water

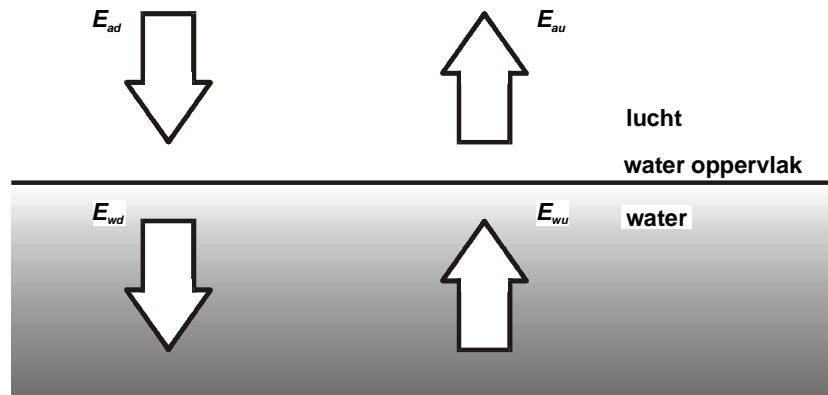
De kleur van water wordt bepaald door de veranderingen in de spectrale verdeling van het licht onder water, ten gevolge van de optisch actieve componenten in het water. De belangrijkste componenten hierbij zijn het fytoplankton, de niet-levende zwevende deeltjes (tripton), de gekleurde opgeloste organische stoffen (CDOM) en uiteraard het water zelf. De spectrale veranderingen in het onderwater-lichtklimaat worden veroorzaakt door absorptie- en verstrooiingsprocessen. Als gevolg van een botsing met een deeltje kan licht enerzijds geabsorbeerd worden aan het deeltje en verdwijnt er licht; anderzijds kan het licht verstrooid worden en verandert de richting van het licht. De waterkleur kan geregistreerd worden als een reflectiespectrum, dat wil zeggen de verhouding tussen het uitredende licht en het invallende licht als functie van de golflengte (Kirk, 1994). Dit reflectiespectrum kan gereconstrueerd worden via optische teledetectie of *remote sensing* vanuit satellieten, vliegtuigen of met behulp van een veldspectroradiometer.

B. Optisch model

De kleur van het water ontstaat doordat de spectrale samenstelling van het invallend licht (direct zonlicht en diffuse hemelstraling) in het water verandert. Invallend licht E_{ad} komt bij het wateroppervlak aan. Aan het grensvlak lucht-water treedt reflectie (weerkaatsing) of bij doordringing van de grenslaag, refractie (lichtbreking) op. Het gerefracteerd deel van het invallende licht verandert onder water van kleur en intensiteit. Twee optische eigenschappen van het water en de daarin voorkomende componenten veroorzaken deze veranderingen: de absorptie, uitgedrukt in een absorptiecoëfficiënt a , en de verstrooiing, uitgedrukt als verstrooiingscoëfficiënt b . Bij absorptie verdwijnt er licht; bij verstrooiing verandert de richting van het licht. Als de richting van de fotonen zodanig wijzigt dat ze een opwaartse richting krijgen, is er sprake van terugverstrooiing b_b . Uit het water afkomstig licht dat we boven het wateroppervlak waarnemen E_{au} (Figuur II.1) is dus een functie van het invallend licht vlak boven het wateroppervlak E_{ad} ; de refractie en reflectie aan de grenslaag lucht/water en water/lucht; de absorptie door alle componenten in het water en het water zelf; de verstrooiing en de terugverstrooiing door de deeltjes in het water en (eventueel) de bodem of ondergedoken waterplanten.

Voor waterkwaliteitsbepalingen op basis van kleur wordt het licht, zoals dat in opwaartse richting vlak onder het wateroppervlak voorkomt, gereconstrueerd, teneinde uit de kleuren en intensiteitsvariëaties de waterkwaliteitsparameters af te leiden. De intensiteit en spectrale verdeling van het onderwaterlicht wordt mede bepaald door zonnestand, aerosol verstrooiing in de atmosfeer en bewolking. Deze afhankelijkheid van de instraling wordt geneutraliseerd door te werken met de irradiantie-reflectie vlak onder het wateroppervlak, gedefinieerd als:

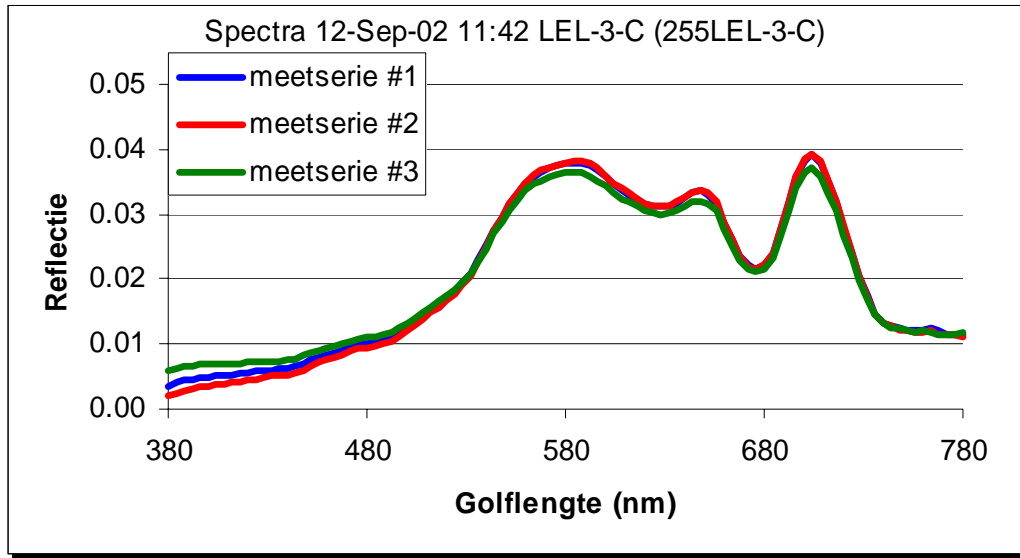
$$R(0^-) = E_{wu} / E_{wd} \quad (\text{II.1})$$



Figuur II.1 Schematische voorstelling van de neerwaartse irradiantie boven het wateroppervlak E_{ad} en onderwater E_{wd} en de opwaartse irradiantie boven het wateroppervlak E_{au} en onderwater E_{wu} .

C. Reflectiespectrum

Het reflectiespectrum is gedefinieerd als de verhouding tussen het uittredende licht en het ingekomen licht op een diepte net onder het wateroppervlak (vgl. 1.1). Het reflectiespectrum is proportioneel aan de ratio tussen de spectrale terugverstrooiing en de spectrale absorptie van water en de diverse componenten in het water (Gordon *et al.* 1975; Krijgsman, 1994). De lokale reflectiemaxima en -minima (figuur II.2) zijn omgekeerd gerelateerd aan de spectrale absorptie eigenschappen van het fytoplankton, tripton, CDOM en water. Bij een lokaal reflectiemaximum hoort een lokaal minimum in absorptie. Bij een lokaal reflectieminimum hoort een maximum in absorptie. In het algemeen zijn er drie reflectie maxima te onderscheiden: 1) de geelgroene piek, rond 570 nm; 2) een piek rond 650 nm en 3) de rode of infrarode piek tussen 700 en 715 nm. Bij golflengtes lager dan 570 nm absorberen pigmenten (met name chlorofyl-*a*), tripton en CDOM. Bij golflengtes groter dan 570 nm spelen tripton en CDOM absorptie geen dominante rol meer. Tussen 570 en 650 nm absorberen vooral de accessoire pigmenten, zoals cyanofycocyanine (C-PC). Tussen 650 en 700 speelt de absorptie van chlorofyl-*a* een rol, terwijl bij golflengtes boven 715 nm absorptie van de watermoleculen van belang is. Het niveau van reflectie in het nabije infrarood is afhankelijk van de verstrooiingseigenschappen van het seston, aangezien bij golflengten > 750 nm alleen water zelf nog significant licht absorbeert.



Figuur II.2 Voorbeeld van een in Loenderveen verkregen reflectiespectrum op basis van PR-650 metingen (3 series, Loenderveen 3 C op 12 september).

D. Theoretische achtergrond bij de PR-650 meetmethode

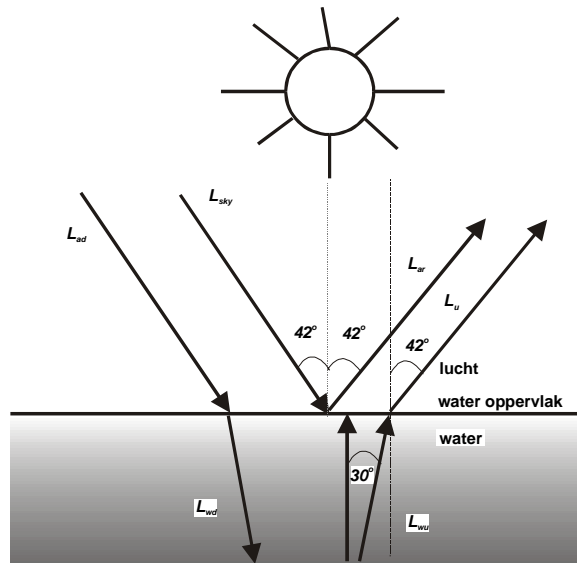
Hier wordt aanvullende informatie gegeven met betrekking tot veldmetingen met de PR-650 veldspectroradiometer en met betrekking tot het berekenen van het reflectiespectrum $R(0-)$ op basis van deze metingen. Voor meer informatie en theoretische achtergrond wordt verwezen naar Gons (1999).

Voor bepaling van $R(0-)$ met de PR-650 worden de volgende metingen verricht (zie Figuur II.3):

1. De opwaartse radiantie boven het wateroppervlak onder een hoek van 42° ($L_{au}(42,90)$) of afgekort (L_{42}).
2. De radiantie van hemellicht bij een zenithhoek van 42° ($L_{ad}(42,f)$) of afgekort (L_{sky}).
3. Reflectie van radiantie vanaf diffuse plaat (L_{rp}).
4. Reflectie van radiantie vanaf diffuse plaat, waarbij invloed van direct zonlicht geblokkeerd is ($L_{r_{fp}}$).

Wanneer de azimuth- (90°) en nadirhoek (42°) van de meting goed zijn gekozen, (dwz. er is geen direct gereflecteerd zonlicht) bestaat de opwaartse radiantie gemeten boven het wateroppervlak ($L_{au}(42,90)$) uit twee componenten, n.l. (i) hemellicht dat op de overgang lucht-water wordt gereflecteerd ($L_{ar}(42,90)$) en (ii) opwaarts onderwaterlicht dat aan het wateroppervlak uittreedt ($L_u(42,90)$):

$$L_{au}(42,90) = L_{ar}(42,90) + L_u(42,90) \quad (\text{II.2})$$



Figuur II.3 Schematische voorstelling van metingen van radiantie vanaf het wateroppervlak met de PR-650. L_{42} en L_{sky} worden bij een nadirhoek en een zenithhoek van 42° bepaald..

Door het apparaat onder een hoek van 42° in plaats van loodrecht op het wateroppervlak te richten kunnen twee voordelen worden behaald. Ten eerste kan buiten de invloed van schaduw en reflectie van het meetplatform (meestal een boot) worden gemeten. Ten tweede kan het meten van glinstering van de zon worden geminimaliseerd door hierbij een azimuthhoek t.o.v. de zon van ongeveer 90° te kiezen.

Op grond van de gemeten verdeling van opwaartse radiantie (Tyler, 1960) en Monte Carlo simulaties concludeerde Kirk (1994), dat, indien de nadirhoek van een instrument boven water niet groter is dan ongeveer 42° (i.e. dit correspondeert met nadirhoek van 30° onderwater), de geschatte radiantie onderwater (verkregen na aftrek van gereflecteerd licht op de overgang lucht-water) gelijkgesteld kan worden aan de radiantie in de verticaal opwaartse richting (L_{wu}) (nadirhoek = 0°). Een hoek van ongeveer 42° kan dus als bovengrens voor de PR-650 metingen worden gekozen. Wanneer het instrument in een lage boot wordt gehanteerd kan men richten op het water tot 1,5 á 2 m vanaf de kant van de boot, voldoende ver om effecten van bootschaduw en -reflectie te kunnen verwaarlozen.

De zenithhoek voor meting van het hemellicht is complementair: ca. 42° . Berekening van het gereflecteerde hemellicht aan het grensvlak lucht-water volgt uit de Fresnel reflectiecoëfficiënt (r_{42}):

$$L_{ar} = r_{42} L_{sky} \quad (\text{II.3})$$

Bij totaal vlak water heeft r de waarde 0,026 voor 42° . In de praktijk zal het gemeten aandeel gereflecteerd licht fluctueren door golven. Onderzoek van Gons (1999) wees uit voor r de waarde 0,029 beter voldeed wanneer het watervlak niet totaal vlak was.

Voor omrekening van de bovenwater radiantie naar de onderwater radiantie dient rekening te worden gehouden met de effecten van breking van uittredend licht aan het wateroppervlak (Austin, 1980):

$$L_{wu} = fL_{au} \quad (\text{II.4a})$$

$$\text{waarbij } f = n^2 / (1 - r) \quad (\text{II.4b})$$

De brekingsindex (n) is een functie van golflengte, temperatuur, zoutgehalte en druk. Er zijn verschillende vergelijkingen voor de brekingsindex bepaald (Buiteveld, 1995). De vergelijking van McNiel (1977) (II.4c) geniet de voorkeur, omdat deze het grootste golflengtegebied (350-800 nm) bestrijkt.

$$n(\lambda, T_c, S) = 1,3247 + 3,3 \cdot 10^3 \lambda^{-2} - 3,2 \cdot 10^7 \lambda^{-4} - 2,5 \cdot 10^{-6} T_c^2 + (5 - 2 \cdot 10^{-2} T_c) 4 \cdot 10^{-5} S \quad (\text{II.4c})$$

waarbij $n(\lambda, T_c, S)$ de brekingsindex, S het zoutgehalte (0/00) en T_c de temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) is. Voor zoet water varieert de factor f tussen 1,809 en 1,852 voor respectievelijk 800 en 400 nm (bij 25°C). De variatie wordt voornamelijk bepaald door de golflengteafhankelijkheid van de brekingsindex. Hier wordt volstaan met een gemiddelde omrekeningsfactor (f) respectievelijk 1,82 (zoet water: Dekker, 1993) en 1,84 (zeewater: Austin, 1980).

Omrekening van opwaartse radiantie naar opwaartse irradiantie onder water wordt gegeven door:

$$E_{wu} = QL_{wu} \quad (\text{II.5})$$

De waarde van Q is vooralsnog onderwerp van discussie binnen de literatuur, de opgegeven waarden variëren van minder dan π tot groter dan 5. Als het stralingsveld vlak onder het wateroppervlak totaal diffuus is, geldt $Q=\pi$. Echter afhankelijk van *o.a.* de richting het licht (zenithoek van de zon), de mate van bewolking en de verstrooiingseigenschappen van de componenten in het water zal het stralingsveld onderwater variëren en dus de waarde van Q . Volgens (Bukata et al., 1988) en medewerkers kan de waarde van Q dan dalen tot een minimum van 3,5. Recent onderzoek met betrekking tot de vergelijking van reflectiemetingen op basis van PR-650 metingen en op basis van onderwaterlichtmetingen in *o.a.* het IJsselmeergebied geeft aan dat Q varieerde tussen 2.7 en 4.6 (Gons, 1999). Voor de berekening van de reflectiespectra in dit rapport werd de methode van Gons aangehouden om Q te bereken (Gons, 1999), hierbij wordt rekening gehouden met de zonnestand en de fractie totaal licht ten opzicht van diffuus licht (F).

De neerwaarts gerichte irradiantie kan met de PR-650 direct worden gemeten bij gebruik van de cosinuscollector, hiervoor moeten echter de objectieven verwisseld worden, waardoor de duur van de meting verlengd wordt. In de praktijk wordt daarom de neerwaartse irradiantie berekend vanuit radiantie metingen aan een diffuse plaat. Voor omrekening van neerwaartse radiantie gemeten aan de diffuse plaat naar irradiantie werden deze metingen gecalibreerd met metingen met de cosinuscollector. De PR-650 is door de fabrikant geijkt voor de cosinuscollector.

$$Lr_p = \pi * E_{ad} \quad (\text{II.6})$$

Als tevens de fractie diffuus licht (F) bekend is, kan irradiantie net onder het wateroppervlak worden berekend: De irradiantie onderwater wordt bepaald door 1) het aandeel direct zonlicht met reflectie bij de zenithhoek van de zon (r_{θ}) en door 2) het aandeel diffuus licht met de gemiddelde reflectie (r_{dif}):

$$E_{wd} = E_{ad} - r_{\theta}(1-F)E_{ad} - r_{dif}FE_{ad} \quad (\text{II.7})$$

Volgens berekeningen van Preisendorfer (1957, cit. in Jerlov, 1976) en Jerlov (1976) varieert r_{dif} voor vlak water tussen 0,052 en 0,066. De waarden corresponderen met respectievelijk een totaal bewolkte (totaal diffuus) hemel en een totaal onbewolkte hemel. In de berekening is de gemiddelde waarde van 0,06 gebruikt. Deze waarde heeft nauwelijks invloed op de totale berekening van $R(0-)$. De reflectiecoëfficiënten in Vgl. II.7 kunnen ook bij golven worden aangehouden wanneer de integratietijd van de meting voldoende lang is.

Als correctie op het licht dat tegen de onderkant van het wateroppervlak terugkaatst wordt de factor $E_{wu} * 0.48$ afgetrokken. Uit combinatie van Vgl. II.1 t/m II.7 volgt de berekening van onderwater irradiantie-reflectie $R(0-)$:

$$R(0-) = \frac{Q_f(L_{au} - r_{sky}L_{sky})}{[\{E_{ad} - r_{ad}(1-F)E_{ad} - r_{dif}FE_{ad}\} + (0.48E_{wu})]} \quad (II.8)$$

Appendix III. Meetprotocol voor gebruik PR-650 in het veld

Onderwerp

Dit meetprotocol beschrijft kort de uitvoering van de metingen in het veld met behulp van de PR-650.

Documentatie

- SpectralColorimeter™ Operating Manual (Photo Research)
- Apparatuur
- PR-650 veldspectroradiometer in draagtas
- reflectiepaneel (10 en 100 %)
- reserve batterij

Uitvoeringsopdracht

Een werkopdracht-/meetformulier met aanwijzing van:

- naam/coördinaten van de meetlocatie (GPS)
- datum en lokale tijd
- wolkenbedekking (0 - 8/8)
- nummer van metingen
- zichtbaarheid algen (gemengd; drijfslagen etc.)
- opmerkingen

Werkwijze

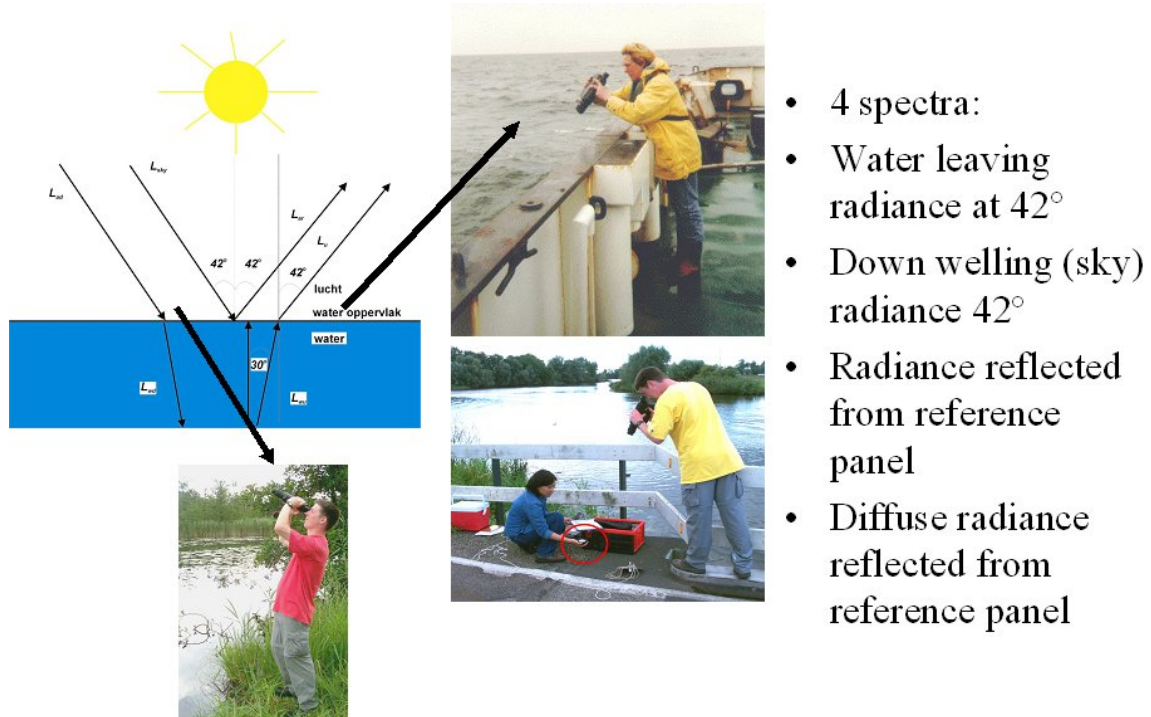
Controles vooraf:

- Zorg dat batterij in PR-650 opgeladen is en zorg dat er een volle reserve batterij meegaat.
- Controleer programma van PR-650 via display instellingen *met betrekking tot* datum; tijd; sensor (ms-75).
- Zorg dat eerder opgenomen data uitgelezen zijn op computer *i.v.m.* automatische overschrijving oude data.

Opmerking: Trek nooit aan de RAM-card in de PR-650 wanneer deze aan staat. De data op de kaart gaat dan verloren (en mogelijk ook de data op de kaart die vervolgens erin geschoven wordt) en de PR650 zal instellingen als datum en tijd verliezen.

Bepaal voorafgaand aan de meetserie de richting van de zon (indien mogelijk). Zorg dat de meetrichting haaks op de zon is (hoek van 90° ten opzichte van de zon). Op deze wijze wordt voorkomen dat de uitvoerder in zijn/haar eigen schaduw meet (bij zon in de rug) en er wordt voorkomen dat er verstoringen optreden door zonneschittering aan het wateroppervlak (bij metingen tegen zon in).

Metingen: zie ook Figuur III.1



Figuur III.4 Meetreeks met de PR650 voor de bepaling van $R(0-)$.

1. Meet in een vaste volgorde en voer de metingen direct na elkaar uit. Schrijf de bijbehorende nummers op het meetformulier direct na afloop van de metingen op. Mislukt één van de metingen, dan dient de hele serie opnieuw uitgevoerd te worden.
2. Richt PR-650 onder een hoek van *ca.* 42° naar het wateroppervlak en druk meetknop in (L_{42}). Zorg dat schaduw van boot vermeden wordt.
3. Richt PR-650 onder een hoek van *ca.* 42° naar hemel en druk meetknop in (L_{sky}). Zo representatief mogelijk deel van de hemel.
4. Richt PR-650 naar reflectiepaneel en druk meetknop in (L_{rp}).
5. Richt PR-650 naar reflectiepaneel, terwijl de invloed van direct zonlicht geblokkeerd is, door bijv. met de hand een schaduwbeeld op het reflectiepaneel te maken en druk meetknop in (L_{rpd}).

Enkele opmerkingen

1. Zorg dat reflectiepaneel min of meer waterpas staat op een plaats (in de boot) waarbij in principe hemellicht uit alle richtingen opgevangen kan worden op het reflectiepaneel.
2. Voer de meting L_{rpd} alleen uit indien een schaduwbeeld mogelijk is.
3. Als er een “overload” waarschuwing optreedt, wordt de L_{rp} -meting uitgevoerd aan het 10 % reflectiepaneel *i.p.v.* het standaard reflectiepaneel van 100 %. De L_{rpd} -meting wordt altijd uitgevoerd aan het 100 % reflectiepaneel.

Data opslag

De data worden automatisch opgeslagen op RAM-card van de PR-650. Lees na afloop van veldtocht de data uit op computer (zie Handleiding voor het werken met de OTM-Tool).